



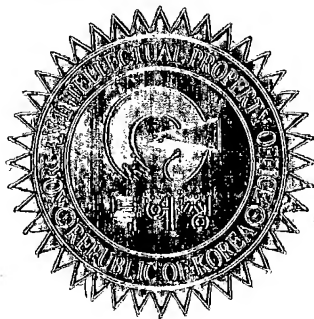
별첨 사본은 아래 출원의 원본과 동일함을 증명함.

This is to certify that the following application annexed hereto  
is a true copy from the records of the Korean Intellectual  
Property Office.

출원번호 : 10-2003-0001614  
Application Number

출원년월일 : 2003년 01월 10일  
Date of Application  
JAN 10, 2003

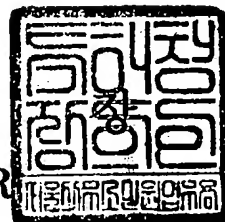
출원인 : 최광진  
Applicant(s)  
CHOI, KWANG-JIN



2003    년    06    월    09    일

특    허    청

COMMISSIONER



## 【서지사항】

【서류명】	출원인 변경 신고서
【수신처】	특허청장
【제출일자】	2003.05.07
【구명의인(양도인)】	
【성명】	고형석
【출원인코드】	4-2002-012178-3
【사건과의 관계】	출원인
【신명의인(양수인)】	
【성명】	최광진
【출원인코드】	4-2001-039081-1
【대리인】	
【명칭】	한양특허법인
【대리인코드】	9-2000-100005-4
【지정된변리사】	변리사 김연수, 변리사 박정서
【포괄위임등록번호】	2002-090325-9
【포괄위임등록번호】	2002-090324-1
【사건의 표시】	
【출원번호】	10-2003-0001614
【출원일자】	2003.01.10
【심사청구일자】	2003.01.10
【발명의 명칭】	직물의 즉좌굴 모델, 이력 모델, 상기 모델들에 기 반한 직물 시뮬레이션 방법 및 이를 수행하는 프로 그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체
【변경원인】	전부양도
【취지】	특허법 제38조제4항·실용신안법 제20조·의장법 제 24조 및 상표법 제12조 제1항의 규정에 의하여 위와 같이 신고합니다. 대리인 한양특허법인 (인)
【수수료】	13,000 원
【첨부서류】	1. 양도증_1통 2. 인감증명서_1통

## 【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【권리구분】	특허
【수신처】	특허청장
【제출일자】	2003.01.10
【국제특허분류】	G06T 16/70
【발명의 명칭】	직물의 즉좌굴 모델, 이력 모델, 상기 모델들에 기반한 직물 시뮬레이션 방법 및 이를 수행하는 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체
【발명의 영문명칭】	IMMEDIATE BUCKLING MODEL, HYSTERESIS MODEL, AND SIMULATION METHOD BASED ON THE INVENTED MODELS, AND COMPUTER-READABLE MEDIA STORING THE PROGRAM EXECUTING THE INVENTED SIMULATION METHOD
【출원인】	
【성명】	고형석
【출원인코드】	4-2002-012178-3
【출원인】	
【성명】	최광진
【출원인코드】	4-2001-039081-1
【대리인】	
【명칭】	한양특허법인
【대리인코드】	9-2000-100005-4
【지정된변리사】	변리사 김연수, 변리사 박정서
【포괄위임등록번호】	2002-090325-9
【포괄위임등록번호】	2002-090324-1
【발명자】	
【성명】	고형석
【출원인코드】	4-2002-012178-3
【발명자】	
【성명】	최광진
【출원인코드】	4-2001-039081-1
【공개형태】	간행물 발표
【공개일자】	2002.07.25
【심사청구】	청구

## 【취지】

특허법 제42조의 규정에 의한 출원, 특허법 제60조의 규정에 의한 출원심사를 청구합니다. 대리인  
한양특허법인 (인)

## 【수수료】

【기본출원료】 20 면 29,000 원

【가산출원료】 9 면 9,000 원

【우선권주장료】 0 건 0 원

【심사청구료】 20 항 749,000 원

【합계】 787,000 원

【감면사유】 개인 (70%감면)

【감면후 수수료】 236,100 원

## 【첨부서류】

1. 요약서·명세서(도면)\_1통 2. 공지에외적용대상(신규성상  
실의예외, 출원시의특례)규정을 적용받 기 위한 증명서류\_1  
통

**【요약서】****【요약】**

본 발명은 직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법 및 이를 수행하는 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 관한 발명으로서, 직물을 근사한 변형 단위 양단에 압축력이 인가될 경우 즉좌굴 모델에 의하여 시뮬레이션하고, 인장력에 의한 직물 변형은 스프링모델에 의하여 시뮬레이션하며, 직물의 이력현상을 스프링-슬립 유닛을 사용하여 모델링하는 것을 특징으로 하는 발명이다.

여기서, 즉좌굴모델은 직물의 변형 단위가 압축력에 의해 수축 없이 즉시 휨 변형을 발생한다는 본 발명에 기초한 모델이다. 이와 같이, 인장력과 압축력에 대하여 별개의 모델을 사용하여 시뮬레이션하고, 직물의 이력 현상을 스프링-슬립 유닛을 사용하여 모델링함으로써, 직물의 특성을 잘 반영할 수 있으며, 압축력에 의하여 발생하는 버클링 불안정성 문제를 해소하여 처리 속도를 향상시킬 수 있다.

**【대표도】**

도 2

**【명세서】****【발명의 명칭】**

직물의 즉좌굴 모델, 이력 모델, 상기 모델들에 기반한 직물 시뮬레이션 방법 및 이를 수행하는 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체{IMMEDIATE BUCKLING MODEL, HYSTERESIS MODEL, AND SIMULATION METHOD BASED ON THE INVENTED MODELS, AND COMPUTER-READABLE MEDIA STORING THE PROGRAM EXECUTING THE INVENTED SIMULATION METHOD}

**【도면의 간단한 설명】**

도 1은 강성 물질의 버클링 현상을 설명하기 위한 강성 물질의 근사도이다.

도 2는 즉좌굴 모델에 따라 직물의 휨 변형을 근사한 근사도의 일 예이다.

도 3은 즉좌굴 모델에 따라 직물의 휨 변형을 근사한 근사도의 다른 일예이다.

도 4는 직물이 불안정한 버클링 상태를 지나 평형 상태에 도달한 경우의 직물 변형의 일예를 도시한 도면이다.

도 5는 즉좌굴 모델에서 압축력의 변화에 대하여 양단에 위치한 입자간 거리의 변화를 도시한 그래프이다.

도 6은 즉좌굴 모델에서 압축력의 변화에 대하여 양단에 위치한 입자간 거리의 변화를 근사적으로 도시한 그래프이다.

도7은 순면의 경우에 측정된 실제 이력 응답 곡선을 도시한 그래프이다.

도8은 슬립 유닛의 구성과 그 반응을 도시한 그림이다.

도9는 스프링 2개와 슬립 유닛을 조합한 구성과 그 반응을 도시한 그림이다.

도10은 본 발명에 따라 직물의 이력 특성을 모델링하기 위하여 슬립 유닛과 스프링을 조합한 일 실시예와 그 반응을 도시한 그림이다.

도11은 본 발명에 따라 직물의 이력 특성을 모델링하기 위하여 무한개의 스프링-슬립 유닛을 조합한 실시예와 그 반응을 도시한 그림이다.

### 【발명의 상세한 설명】

### 【발명의 목적】

### 【발명이 속하는 기술분야 및 그 분야의 종래기술】

<12> 본 발명은 직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법 및 이를 수행하는 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능 매체에 관한 발명으로서, 보다 상세하게는 직물을 근사한 변형 단위 양단에 작용하는 압축력에 의한 직물 변형은 수축 없이 즉시 휨 변형되는 즉좌굴 모델에 의하여 시뮬레이션하고, 인장력에 의한 직물 변형은 스프링모델에 의하여 시뮬레이션하며, 직물의 이력 특성은 새로운 이력 모델인 "최·고"-이산이력모델과 "최·고"-연속이력모델을 사용하여 모델링함으로써, 직물의 특성을 잘 반영하고 버클링 불안정성 문제를 해소하여 처리 속도를 향상시킨 시뮬레이션 방법 및 기록 매체에 관한 발명이다.

<13> 일반적으로, 얇은 구조체는 휨에 대한 약한 저항성과 인장력에 대한 강한 저항성을 갖고 있다. 이러한 특성 때문에 얇은 구조체의 움직임은 강성 미분방정식을 푸는 것으로 귀결된다. 얇은 구조체의 양단에 압축력이 인가되면 압축력에 의한 길이 방향의 수축이 일어난다. 압축력이 증가하여 임계치를 넘어서면 얇은 구조체는 압축력에 수직인 방향으로 휘어지며, 이를 버클링이라 칭한다. 이 버클링은 순간적으로 발생하는

변형이므로 매우 불안정한 반응이며, 이러한 버클링 반응을 시뮬레이션하는 것은 미분 방정식의 수치적 풀이에 있어서 발산의 문제를 야기한다.

<14> 여기서 말하는 버클링 불안정성이란 압축력이 감소하더라도 휨 변형 (버클링) 은 오히려 증가하는 특성을 의미한다. 다시 말하면, 불안정한 버클링 상태에서는 버클링 방향에서의 물질의 강성율은 순간적으로 음의 값이 된다. 이와 같은 버클링 불안정성은 시스템 매트릭스에 특이성의 문제를 야기하므로, 유한한 시간 스텝의 시뮬레이션에서는 발산되어 버리는 문제가 발생할 수 있다.

<15> 종래의 직물 시뮬레이션에서는 이러한 버클링 불안정성이 존재하는 모델을 사용하였기 때문에 직물에 주름이 생기는 현상을 시뮬레이션하기 어려웠다. 버클링 불안정성은 수치적 불안정성이 아니고 구조체의 구조적 불안정성에서 비롯한 것이므로, 단순히 미분방정식을 암시적(implicit) 으로 적분한다고 하여 해결되는 것은 아니다.

<16> 종래에는 시스템 매트릭스에 댐핑력에 관한 항을 부가하여 이러한 버클링 불안정성 문제를 해결하고자 하였다. 그러나, 이러한 댐핑력의 부가는 시스템을 안정시킬 수는 있으나, 직물의 자연스런 움직임 구현하는데는 장애가 된다. 즉, 댐핑력은 직물 표면에 주름이 형성되는 것을 방해하거나, 생성된 주름이 소멸되는 것에 저항하는 요소로서 작용하게 된다. 따라서, 단순히 댐핑력을 부가하는 것은 직물 움직임 시뮬레이션에 바람직하지 않다.

<17> 또한, 종래에는 직물을 모델링함에 있어서, 연속체 모델을 사용하였으나, 이러한 모델링은 다음과 같은 점에서 바람직하지 않은 결과를 낳았다. 즉, 컴퓨터 그래픽 분야에서는 합리적인 성능을 보장하기 위하여 성긴 이간화가 허용되어야 하지만, 연속체



모델에서는 직물의 큰 변형을 만들어 내기 위하여 아주 미세한 메시가 요구되므로, 합리적인 처리 속도를 구현할 수 없게 된다.

<18> 또한, 연속체 모델을 사용할 경우에는 버클링과 연관된 발산 문제를 다루기 위해 많은 추가적인 연산을 필요로 한다. [Eischen et al. 1996] 에는 의복에 대한 비선형 셀 모델을 이용하고, 유한 요소 해석을 수행하여 주름 형상을 얻었다. 여기서는 하중-변형 곡선의 비선형성에 기인한 발산 또는 버클링에 의한 시스템 매트릭스의 특이성 문제를 방지하기 위하여 호 길이 (arc length) 제어와 같은 수단을 이용해야만 했고, 발산하지 않도록 특별한 주의를 기울여야 했다.

<19> [Baraff and Witkin 1998] 에서는 연속체인 삼각형이 서로 연결되어 있는 모델을 제안하고, 평면 방향으로의 변형 에너지는 연속체 구조 공식으로부터 유도하고, 휨 변형 측정은 인접한 삼각형들 사이의 각도로부터 유도함으로써, 휨 변형과 평면 방향 변형을 독립적으로 취급하였다. 이러한 독립적인 취급은 각 삼각형의 평면 방향 강성과 관계없이 삼각형들 사이에서 대량의 휨 변형을 허용한다는 점에서 연속체 모델의 단점을 보완할 수 있으나, 각 삼각형이 압축 불가능한 물질로 모델링되어 있고, 삼각형들 사이의 휨 강성이 매우 약하기 때문에, 버클링 불안정성이 여전히 문제될 수 있다.

<20> 또한, 종래에는 직물의 이력 특성을 직물 시뮬레이션에 도입하기 위해서 직물의 이력 특성을 측정한 결과를 직접 사용하였으나, 측정에 의해 얻어진 이력 반응 곡선 (hysteretic response curve)은 측정시 곡률 변화와 시뮬레이션시 곡률 변화가 동일할 경우에만 적용 가능하기 때문에 일반적으로 동역학적 (dynamic) 시뮬레이션에는 적합하지 않다. 즉, 이력 반응 곡선은 전체 곡률 변화의 과정에 대한 함수(function of

entire curvature history)이기 때문에, 물리적 모델을 세우지 않고 측정 곡선을 가지고 시뮬레이션 하는 것은 합리적이지 않다.

### 【발명이 이루고자 하는 기술적 과제】

<21> 따라서, 본 발명의 목적은 버클링 불안정성이 존재하지 않는 모델을 사용함으로써, 미세한 메싱 및 시간 스텝을 사용하지 않더라도 직물 특유의 주름지는 모습과 이력 현상을 사실적으로 시뮬레이션 하는 방법을 제공하는 것이다.

<22> 본 발명의 다른 목적은 상기 직물 모델을 활용하여 직물의 특성을 더욱 잘 반영하며, 버클링 불안정성 문제를 해결함으로써, 처리 속도가 보다 빠른 직물 시뮬레이션 방법 및 이를 수행하는 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체를 제공하는 것이다.

### 【발명의 구성 및 작용】

<23> 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명이 제안하는 모델은 즉좌굴 모델, "최·고"-이산 이력모델, "최·고"-연속이력모델이다. 즉좌굴 모델은 직물을 근사한 변형 단위 양단에 압축력이 작용할 경우 (직물에 압축력이 인가될 경우), 수축되지 않고 즉시 휨 변형이 발생하는 모델로서 압축에 의한 직물의 변형을 시뮬레이션하는데 사용된다.

<24> "최·고"-이산이력모델은 직물의 이력 현상을 유한개의 스프링-슬립 유닛을 사용하여 모델링한 것으로서, 곡률과 모멘트간의 이력 현상을 시뮬레이션하는데 사용된다. "최·고"-연속이력모델은 직물의 이력 현상을 무한개의 스프링-슬립 유닛을 사용하여 모델링한 것으로서, 곡률과 모멘트간의 이력 현상을 시뮬레이션하는데 사용한다.

- <25> 이외에도, 스프링모델은 직물을 근사한 변형 단위 양단에 인장력이 작용할 경우 (직물에 인장력이 인가될 경우), 이에 의한 직물의 변형을 시뮬레이션하는데 사용된다.
- <26> 이하에서는 직물에 작용하는 압축력 및 인장력에 대한 직물의 움직임을 각각 그에 적합한 모델을 사용하여 해석한다.
- <27> (즉좌굴 모델에 의한 직물의 휨 변형 해석)
- <28> 본 발명에서는 직물에 압축력이 인가되면 압축력에 저항하거나 수축되지 않고 즉시 휘어지는 모델인 즉좌굴 모델을 사용하여 직물의 휨 변형을 시뮬레이션한다. 이때 휨 변형에 의하여 직물에 축적된 휨 변형 에너지는 추정되어지는 변형 형태로부터 계산할 수 있다.
- <29> 도 2를 참조하여 압축력으로 인한 직물의 휨 변형에 대한 변형에너지를 구하는 과정을 기술한다. 도 2에 도시된 즉좌굴 모델은 직물의 소정 변형 단위의 양단간을 면적을 갖지 않는 빔으로 근사화한 것이나, 반드시 그럴 필요는 없으며, 면적을 갖는 판으로 근사화할 수도 있으며, 이에 대해서는 추후 설명한다.
- <30> 도 2에 따르면, 압축력이 가해지기 전 즉, 버클링 이전에는 소정의 변형 단위는 양단간 길이가  $L_1$  인 직선 빔 형태이다. 버클링을 일으킨 후에 상기 구조는 도시된 바와 같이 안정적인 평형 상태 (휘어짐)에 도달한다. 일 예로서, 본 발명에서는 일정한 길이를 갖는 원호로써 평형 상태의 형상을 근사한다. 즉, 변형 전과 후의 양단 사이의 길이 자체는 공히  $L_1$  으로서 변화가 없고 (즉, 수축변형을 일으키지 않고),  $L_1$  길이의 직선이  $L_1$  길이의 원호로 변형 (휨 변형만 발생함) 된다고 근사한다.
- <31> 추정된 형상의 휨 변형 에너지는 다음의 관계식으로부터 구해진다.

<32> 
$$E = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} MK dx \dots\dots\dots(1)$$

<33> 여기서, M 은 휨 모멘트이고, K 는 곡률이며, 전체적으로 곡률이 일정하고, 곡률과 휨 모멘트의 관계가 선형적 ( $M=k_b K$ ) 이라고 일단 가정하면 (비선형인 경우에 대해서는 추후 기술됨), 휨 변형 에너지는 다음과 같다.

<34> 
$$E = \frac{1}{2} k_b L_1 K^2 \dots\dots\dots(2)$$

<35> 여기서,  $k_b$  는 휨 강성율을 나타낸다.

<36> 원호가 최초의 직선길이  $L_1$  과 같다고 가정하였으므로, 곡률 K 는 양단 사이의 거리인  $|x_{ij1}|$ 만을 사용하여 다음과 같이 표현되며,

<37> 
$$K = \frac{2}{L_1} \text{sinc}^{-1}\left(\frac{|x_{ij1}|}{L_1}\right), \text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x} \dots\dots\dots(3)$$

<38> 식 (3)을 식 (2)에 대입하고 미분하면 휨 벡터는 다음과 같이 유도된다.

<39> 
$$f_i = -\frac{dE}{dx_i} = k_b K L_1 \frac{dK}{d|x_{ij1}|} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} = k_b K L_1 \left(\frac{d|x_{ij1}|}{dK}\right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots(4)$$

<40> 
$$= k_b K^2 \left(\cos \frac{KL_1}{2} - \text{sinc}\left(\frac{KL_1}{2}\right)\right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots\dots(5)$$

<41> 
$$= f_b(|x_{ij1}|) \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots\dots(6)$$

<42> 도 5는 압축력과 변형 단위의 양단 간 거리의 함수관계를 도시한 그래프이다.

도 5에 도시된 바와 같이, 본원발명은 즉좌굴 모델을 사용하므로, 압축력이 인가되면, 압축력을 가하는 순간 버클링이 발생한다 (수축변형 없이 즉시 휘어진다). 그 후, 임

계치 ( $P_{cr}$ ) 이상의 압축력이 인가되면 상당한 크기의 휨 변형을 일으킨다. 여기서, 임계치 이하의 압축력에 대한 변형은 도 6에 도시된 바와 같이 직선으로 근사한다.

즉,

$$<43> \quad f_b^* = \begin{cases} c_b(|x_{ij1}| - L_1), & f_b < c_b(|x_{ij1}| - L_1) \\ f_b, & \text{otherwise} \end{cases}$$

<44> 여기서,  $c_b$  는 임의로 선택한 상수이다.

<45> 이와 같이 곡선을 근사하더라도, 결과에는 큰 차이가 없다.

<46> 상술한 힘 벡터의 자코비안 매트릭스는 다음과 같이 유도된다.

$$<47> \quad \frac{df_i}{dx_j} = \frac{df_b^*}{d|x_{ij1}|} \frac{x_{ij1}x_{ij1}^T}{x_{ij1}^T x_{ij1}} + \frac{f_b^*}{|x_{ij1}|} \left( I - \frac{x_{ij1}x_{ij1}^T}{x_{ij1}^T x_{ij1}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

<48>  $\frac{df_b^*}{d|x_{ij1}|}$  은 항상 양수이지만,  $\frac{f_b^*}{|x_{ij1}|}$  은 항상 음수이므로, 두 번째 항은 시스템 매트릭스의 특이성 문제를 야기할 가능성이 있다. 따라서, 두 번째 항을 삭제한다. 상술한 과정을 통하여 구한, 음수항을 삭제한 자코비안 매트릭스는 즉좌굴 모델을 사용하여 직물의 휨 변형을 해석한 최종 결과이다.

<49> 상술한 실시 예에서는 직물의 소정 변형 단위 양단 간의 영역을 면적을 갖지 않는 빔으로 모델링하였으나, 반드시 그럴 필요는 없으며, 면적을 가지는 판으로 모델링 할 수도 있다. 이 영역을 도 3에 도시된 바와 같이 삼각형태의 판으로 모델링할 경우에 휨 변형 에너지는,

$$<50> \quad E = \frac{1}{2} \int_{A_i \cup A_j} MK da = \frac{1}{2} k_b (A_i + A_j) K^2 \dots\dots\dots (8)$$

<51> 와 같다. (여기서,  $A_i$  와  $A_j$  는 도시된 바와 같이 면적을 의미한다.)

<52> 이 경우에 힘 벡터는,

$$<53> \quad f_i = -\frac{dE}{dx_i} = k_b K(A_i + A_j) \frac{dK}{d|x_{ij1}|} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|}$$

$$<54> \quad = k_b K(A_i + A_j) \left( \frac{d|x_{ij1}|}{dK} \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|}$$

$$<55> \quad = \frac{k_b}{L_1} (A_i + A_j) K^2 \left( \cos \frac{KL_1}{2} - \operatorname{sinc} \left( \frac{KL_1}{2} \right) \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots \dots \dots (9)$$

<56> 와 같이 구해진다. 이후의 과정은 빔으로 모델링한 경우와 동일하다. 단, 이 경우 평형 상태의 기하학적 형상은 원통형이라 가정한다.

<57> 위에서는 평형 상태에 도달한 안정된 구조를 원호 또는 원통으로 가정하였으나, 시뮬레이션 결과는 가정된 기하학적 형상에 크게 좌우되지 않으므로, 다른 형상으로 가정할 수 있다.

<58> (이력 모델에 의한 직물의 힘 변형 해석)

<59> 상술한 측좌굴 모델에서 변형 에너지를 구할 때, 구조체의 곡률(curvature)과 힘 모멘트(bending moment)가 선형적 관계에 있다고 가정하였다. 그러한 가정은 비단과 같은 직물에는 잘 적용될 수 있으나, 면직물 등 여러 직물은 이력 현상(hysteresis)을 가지고 있기 때문에, 그러한 가정이 맞지 않을 수 있다. 도 7은 100% 순면의 경우 힘 모멘트와 곡률의 관계가 이력 특성을 갖고 있음을 보여준다.

<60> 종래에는 이러한 이력 특성을 직물 시뮬레이션에 도입하기 위해서 직물의 이력 특성을 측정한 결과를 직접 사용하였으나, 측정에 의해 얻어진 이력 반응 곡선(hysteretic

response curve)은 측정시 곡률 변화와 시뮬레이션시 곡률 변화가 동일할 경우에만 적용 가능하기 때문에 일반적으로 동역학적 (dynamic) 시뮬레이션에는 적합하지 않다.

<61> 즉, 이력 반응 곡선은 전체 곡률 변화의 과정에 대한 함수(function of entire curvature history)이기 때문에, 물리적 모델을 세우지 않고 측정 곡선을 가지고 시뮬레이션 하는 것은 합리적이지 않다.

<62> 한편, 일반적으로 이력 현상은 소성과 관련이 깊으며, 이러한 이력 현상을 해석하기 위하여 도 8 및 도 9에 도시된 바와 같은 이력 모델을 사용하는 것은 널리 알려져 있다. 도 8에서는 이상적 소성을 가진 슬립(slip) 유닛을 도시하고 모멘트(F)에 대한 곡률(X)의 관계식을 각기 도시하고 있으며, 도 9에서는 스프링과 슬립 유닛을 사용하여 기본적인 이력 특성을 물리적으로 모델링한 이력 모델과 그 모델이 보이는 이력 특성을 도시하였다. 그러나, 도 9에 도시된 바와 같이, 기본적인 이력 특성을 보이는 물리 모델은 실제 직물의 이력 특성 (도 7 참조)을 근사하기에는 부족하다.

<63> 따라서, 기본적인 이력 특성이 아닌 직물 특유의 이력 특성을 해석하기 위해서는 직물에 적합한 이력 모델을 사용할 필요가 있으며, 본 발명에서는 새로운 이력 모델을 사용함으로써, 도 7과 같은 실제 직물의 이력 반응 곡선을 만들어 낼 수 있게 되었다.

<64> 이에 대하여 상세히 설명하면, 본 발명에서는 소성을 갖는 슬립(slip) 유닛 n개와 탄성을 갖는 스프링 n+1개를 도 10에 도시된 바와 같이 병렬적 방식으로 구성한 모델을 사용하여 모멘트와 곡률 사이의 이력 특성을 시뮬레이션한다.

- <65> 도 10는 본 발명의 일 실시예로서 4개의 스프링과 3개의 슬립 유닛을 연결하여 이력 모델을 구성하였을 때의 이력 반응 곡선을 보여준다. 각 슬립 유닛과 스프링 유닛의 반응을 참조하면, 전체 모델의 반응곡선은 선분들의 연속이며, 선분들의 기울기는 원점에서 출발하여 각각  $K_0+K_1+K_2+K_3$ ,  $K_0+K_2+K_3$ ,  $K_0+K_3$ ,  $K_0$  이 된다.
- <66> 도 10에 도시된 바와 같이, 모멘트가 줄어들게 되면 반응곡선은  $A_4A_5$ ,  $A_5A_6$ ,  $A_6A_7$ ,  $A_7A_8$ 의 경로를 따르게 된다. 여기서,  $A_4A_5$ ,  $A_5A_6$ ,  $A_6A_7$ ,  $A_7A_8$ 은  $OA_1$ ,  $A_1A_2$ ,  $A_2A_3$ ,  $A_3A_4$ 와 각각 평행하지만 길이가 두 배이므로 비대칭성이 발생하게 된다.
- <67> 본 발명에서는 슬립 유닛과 스프링의 개수, 그리고 각 슬립 유닛의 임계 모멘트, 각 스프링의 상수의 값을 조절함에 의해 임의의 이력 특성을 표현할 수 있으며, 결과적으로 곡률  $K$ 에 대한 모멘트 함수인  $M(K)$ 의 형태로 주어지게 된다.
- <68> 상술한 새로운 이력 모델을 즉좌굴 모델에 의한 직물의 힘 변형 해석에 적용시키기 위해서는 식 (8)의  $M$  대신에 이력모델에 의한 함수  $M(K)$ 를 대입하면 된다. 이하에서는 위의 이력 모델을 "최·고"-이산이력모델이라 칭한다.
- <69> 또한, 본 발명에서는, 상술한 이력 모델에 추가하여, 도 10의 반응 곡선이 도 11의 우측 곡선에서 보는 바와 같이 부드러운 곡선을 이루도록 하는 획기적인 방법을 개발하였다. 본 발명에서는 위에서 도출한 이산이력모델의 반응 곡선에서 소성 변형이 일어나기 시작하는 부분부터 소성 변형이 끝나는 부분 (도 10의  $A_1$ ,  $A_3$  사이와  $A_5$ ,  $A_7$  사이)까지를 해석함에 있어서, 무한 쌍의 스프링-슬립 유닛이 도 11의 좌측에서 보는 바와 같이 병렬 연결되어 있는 모델을 사용한다.



<70> 여기서, 첫 번째 임계치에 도달하는 슬립 유닛의 임계치를  $\sigma_{\min}$ , 마지막으로 임계치에 도달하는 슬립 유닛의 임계치를  $\sigma_{\max}$ 라 하면, 무한개의 슬립 유닛 임계치는  $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$ 사이에서 균일하게 분포하며, 슬립 유닛과 직렬로 연결되는 모든 스프링의 상수는 (무한소의 값으로) 동일하다고 모델링한다.

<71> 이 때,  $K$ 를 스프링 상수의 총합을 곡선의 위 부분 중 소성변형이 일어나는 구간의 길이로 나눈 값이라 하고, 도 10의 설명에 따르면, 이 경우 반응곡선의 기울기의 변화율이 일정하므로,  $\frac{d}{dX} \left( \frac{dF}{dX} \right) = -K$ 가 된다. 여기서, 두 개의 조건만 주면 이력곡선의 곡선 부분에 해당하는 2차 함수가 유일하게 결정된다. 반응 곡선의 아래 부분은 길이가 두 배임을 감안하여,  $\frac{d}{dX} \left( \frac{dF}{dX} \right) = 0.5K$ 로 모델링할 수 있다. 단, 이차 도함수의 절대값의 크기가 이렇게 반이 되는 것은 이미 임계치를 넘은 슬립 유닛들 분에 한하며, 아직 임계치를 넘지 않은 슬립 유닛에 대해서는  $\frac{d}{dX} \left( \frac{dF}{dX} \right) = K$ 를 사용해야 한다. 도 11의 우측에 도시된 곡선은 본 발명의 극한 이력 모델에 따라 도출된 이력곡선의 일 실시예를 도시한 것이다.

<72> 극한 이력 모델에서 특기할 만한 사실은 유한개의 슬립 유닛을 사용했을 때는 각 슬립 유닛의 상태를 저장해야 했지만, 무한개를 사용함으로써 오히려 저장용량을 줄일 수 있으며 동시에 보다 실제에 가까운 이력 특성을 시뮬레이션할 수 있다는 것이다. 이하에서는 위의 극한 이력 모델을 "최·고"-연속이력모델이라 칭한다.

<73> (스프링 모델에 의한 직물의 인장 변형 해석)

<74> 인장력이 직물에 인가될 경우에는 직물의 소정 변형 단위의 양단 간에 스프링 모델을 사용함으로써, 직물의 움직임을 시뮬레이션한다. 압축력이 인가된 경우와 마찬가지로

지로, 여기서도 인장력에 의하여 소정의 변형 단위에 축적된 인장 변형 에너지를 구함으로써, 인장력에 의한 직물의 움직임을 시뮬레이션한다. 인장 변형 에너지 함수는 다음과 같다.

$$\langle 75 \rangle \quad E = \begin{cases} \frac{1}{2} k_s (|x_{ij2}| - L_2)^2, & |x_{ij2}| \geq L_2 \\ 0, & |x_{ij2}| < L_2 \end{cases} \dots\dots\dots (10) \quad \text{여기서}$$

$x_{ij2}$  는 소정 변형 단위의 양단간의 거리이며,  $L_2$  는 인장력이 인가되지 않은 상태에서의 거리이며,  $k_s$  는 스프링 상수이다.  $|x_{ij2}| < L_2$  일 경우에는 변형 에너지가 0 이므로, 입자들 간에 인장력이 작용할 경우에만 상기 모델이 적용됨을 알 수 있다.

$\langle 76 \rangle$       상기 에너지 식으로부터, 소정 변형 단위의 양단간 어느 위치에 작용하는 힘은

$$\langle 77 \rangle \quad f_i = -\frac{dE}{dx_i} = \begin{cases} k_s (|x_{ij2}| - L_2) \frac{x_{ij2}}{|x_{ij2}|}, & |x_{ij2}| \geq L_2 \\ 0, & |x_{ij2}| < L_2 \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

$\langle 78 \rangle$       와 같이 표현되며,

$\langle 79 \rangle$       상기 힘 벡터의 자코비안 매트릭스는,

$$\langle 80 \rangle \quad \frac{df_i}{dx_j} = \begin{cases} k_s \frac{x_{ij2} x_{ij2}^T}{x_{ij2}^T x_{ij2}} + k_s (1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|}) (I - \frac{x_{ij2} x_{ij2}^T}{x_{ij2}^T x_{ij2}}), & |x_{ij2}| \geq L_2 \\ 0, & |x_{ij2}| < L_2 \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

$\langle 81 \rangle$       와 같다.

$\langle 82 \rangle$       상기 자코비안 매트릭스의 첫째 항은 선형 스프링을 이용하여 직물에 인장력이 작용할 경우를 모델링한 결과로서, 인장력에 의한 상호작용 방향에서의 강성 (stiffness) 이 일정하다는 것을 의미한다. 두 번째 항은 상호작용 방향에 직교하는 방향에서의 강

성이,  $(1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|})$  에 비례한다는 것을 의미한다. 직물이 평면 형상이므로, 상호작용에 직교하는 방향은 평면에 수직하는 방향에 해당한다.

<83> 스프링 모델은 인장력이 작용하는 경우에만 적용되는 모델이므로,  $|x_{ij2}|$  값은  $L_2$  보다 클 수밖에 없기 때문에  $(1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|})$  값은 1보다 작은 양수가 되므로, 이 시스템은 안정적이다. 만약, 스프링 모델을 압축력이 작용하는 경우에 적용하게 되면,  $|x_{ij2}|$  값이 0으로 근접함에 따라  $(1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|})$  값은 음의 무한대로 발산하므로, 전체 시스템 매트릭스  $(I - \alpha df/dv + \beta df/dx)$  는 시간 스텝의 크기에 관계없이 특이성 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 본 발명에서는 압축력이 작용할 경우에는 스프링 모델을 사용하지 않는다.

<84> 참고로, 종래기술인 [Volino and Magnenat-Thalmann 2000]에서는 인장과 압축 모두에 대해 동일한 스프링 모델을 사용하며, 식 (13)의 자코비안 매트릭스의 두 번째 항을 인장과 압축에서 모두 생략한다. 또한, 두 번째 항의 생략으로 인하여 직교방향으로의 고유치가 제로가 되는 것을 방지하기 위하여 댐핑 항을 추가한다. 이와 같이, 댐핑 항을 추가함으로써, 시스템 매트릭스의 상태를 개선할 수는 있으나, 직물의 움직임에 불필요한 높은 저항을 야기함으로써, 직물의 특성을 제대로 반영할 수 없다.

<85> 본 발명에서는 압축력의 작용에 관해서는 수축변형 없이 즉시 휨 변형을 일으키는 즉좌굴 모델을 사용하고 인장력의 작용에 관해서는 스프링 모델을 사용함으로써, 가상의 댐핑 항을 추가하지 않고도 시스템 매트릭스의 불안정성을 해소할 수 있기 때문에 직물의 특성을 보다 잘 반영하여 시뮬레이션 할 수 있다.

**【발명의 효과】**

<86> 이상 설명한 바와 같이, 본 발명은 즉좌굴 모델과 스프링 모델을 사용하여 각각 압축력과 인장력에 의한 변형을 시뮬레이션 함으로써, 버클링 현상의 구조적 불안정성을 해결하여 직물의 움직임을 빠른 속도로 시뮬레이션 할 수 있으며, "최·고"-이산이력모델과 "최·고"-연속이력모델을 사용하여 직물의 이력 특성을 보다 잘 반영하는 직물 움직임을 시뮬레이션 할 수 있다.

<87> 이상은 본 발명을 예를 들어 설명한 것으로서, 본 발명은 상술한 예에 한정되지 않으며, 본 발명의 권리는 첨부된 특허청구범위에 기재된 바에 따라 결정된다. 또한, 동 업계에 종사하는 자에 의하여 본 발명의 다양한 변형 예들이 실시될 수 있으나, 이는 모두 본 발명의 권리 범위에 속하는 것임을 명백히 한다.

**【특허청구범위】****【청구항 1】**

직물의 움직임을 시뮬레이션 하는 방법에 있어서,

직물을 근사한 변형 단위 양단에 압축력이 인가될 경우, 수축되지 않고 즉시 휨 변형이 발생하는 즉좌굴 모델을 사용하는 것을 특징으로 하는 시뮬레이션 하는 방법.

**【청구항 2】**

직물의 움직임을 시뮬레이션 하는 방법에 있어서,

직물을 근사한 변형 단위에 발생한 휨 변형의 형태를 상기 변형 단위의 양단간 거리의 함수로 추정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 시뮬레이션 방법.

**【청구항 3】**

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법에 있어서,

직물을 근사한 변형 단위에 발생한 휨 변형의 형태를 추정함에 의해 상기 변형 단위에 축적된 휨 변형 에너지를 구하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 시뮬레이션 하는 방법.

**【청구항 4】**

직물이 휨 변형을 일으킬 경우, 휨 변형 형태를 나타내는 곡률과 모멘트간의 이력 특성을 모델링하는 수단으로서, 상기 수단은

$n$  ( 정수) 개의 슬립 유닛; 및

$n+1$  개의 스프링을 포함하며,

상기  $n$  개의 슬립 유닛은 각각  $n$  개의 스프링과 직렬 연결되어  $n$  쌍의 스프링-슬립 유닛을 형성하며,

상기  $n$  쌍의 스프링-슬립 유닛과 1 개의 스프링이 병렬 접속되어 있는 것을 특징으로 하는 곡률과 모멘트간의 이력 특성을 모델링하는 수단.

#### 【청구항 5】

제 4 항에 있어서,

상기 스프링-슬립 유닛 쌍이 무한 쌍 병렬로 접속되어 있는 것을 특징으로 하는 곡률과 모멘트간의 이력 특성을 모델링하는 수단.

#### 【청구항 6】

제 2 항에 있어서,

상기 추정하는 단계는,

상기 변형 단위 양단의 거리에 따라 상기 변형 단위의 곡률을 추정하는 단계; 및

추정된 곡률로부터 힘 변형의 형태를 추정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 시뮬레이션하는 방법.

#### 【청구항 7】

제 3 항에 있어서,

상기 힘 변형 에너지를 미분함으로써, 상기 변형 단위의 양단간의 위치에 따른 힘 벡터를 구하는 단계; 및

상기 힘 벡터로부터 자코비안 매트릭스를 구하는 단계를 포함하며,

상기 자코비안 매트릭스는 직물의 힘 변형을 시뮬레이션하기 위한 성분임을 특징으로 하는 시뮬레이션하는 방법.

【청구항 8】

제 7 항에 있어서,

상기 자코비안 매트릭스는 음의 고유치를 가지는 행이 제거된 것임을 특징으로 하는 시뮬레이션하는 방법.

【청구항 9】

직물의 움직임을 시뮬레이션 하는 방법에 있어서,

상기 곡률과 모멘트간의 이력 특성은 제 4 항 또는 제 5 항에 기재된 수단을 사용하여 구하는 것을 특징으로 하는 시뮬레이션 하는 방법.

【청구항 10】

제 1 항, 제 2 항, 제 3 항, 제 6 항, 제 7 항, 제 8 항 중 어느 한 항에 있어서,

직물을 입자모델로 모델링할 경우, 상기 변형 단위는 연속된 또는 인접한 복수의 입자들로 이루어진 것을 특징으로 하는 시뮬레이션하는 방법.

【청구항 11】

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법을 수행하는 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 있어서, 상기 방법은

직물을 근사한 변형 단위 양단에 압축력이 인가될 경우, 수축되지 않고 즉시 힘 변형이 발생하는 즉좌굴 모델을 사용하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

## 【청구항 12】

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법을 수행하는 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 있어서, 상기 방법은

직물을 근사한 변형 단위에 발생한 휨 변형의 형태를 상기 변형 단위의 양단간 거리의 함수로 추정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

## 【청구항 13】

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법을 수행하는 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 있어서, 상기 방법은

직물을 근사한 변형 단위에 발생한 휨 변형의 형태를 추정함에 의해 상기 변형 단위에 축적된 휨 변형 에너지를 구하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

## 【청구항 14】

제 12 항에 있어서,

상기 추정하는 단계는,

상기 변형 단위 양단의 거리에 따라 상기 변형 단위의 곡률을 추정하는 단계; 및

추정된 곡률로부터 휨 변형의 형태를 추정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

## 【청구항 15】

제 13 항에 있어서,



상기 힘 변형 에너지를 미분함으로써, 상기 변형 단위의 양단간의 위치에 따른 힘 벡터를 구하는 단계; 및

상기 힘 벡터로부터 자코비안 매트릭스를 구하는 단계를 포함하며,

상기 자코비안 매트릭스는 직물의 힘 변형을 시뮬레이션하기 위한 성분임을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

【청구항 16】

제 15 항에 있어서,

상기 자코비안 매트릭스는 음의 고유치를 가지는 행이 제거된 것임을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

【청구항 17】

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법을 수행하는 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 있어서, 상기 방법은

상기 곡률과 모멘트간의 이력 특성은 제 4 항 또는 제 5 항에 기재된 수단을 사용하여 구하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

【청구항 18】

제 11 항, 제 12 항, 제 13 항, 제 14 항, 제 15 항, 제 16 항 중 어느 한 항에 있어서,

직물을 입자모델로 모델링할 경우, 상기 변형 단위는 연속된 또는 인접한 복수의 입자들로 이루어진 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

## 【청구항 19】

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법에 있어서,

직물을 근사한 변형 단위 양단에 압축력이 인가될 경우, 수축되지 않고 즉시 휨 변형이 발생하는 즉좌굴 모델을 사용하여, 압축력에 의한 상기 변형 단위의 변형 형태를 추정하는 단계;

상기 변형 단위의 상기 추정된 변형 형태로부터 상기 변형 단위에 축적된 휨 변형 에너지를 구하는 단계; 및

상기 휨 변형 에너지를 이용하여 직물의 휨 변형을 시뮬레이션 하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 시뮬레이션하는 방법.

## 【청구항 20】

직물의 움직임을 시뮬레이션하는 방법을 수행하는 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 있어서, 상기 방법은

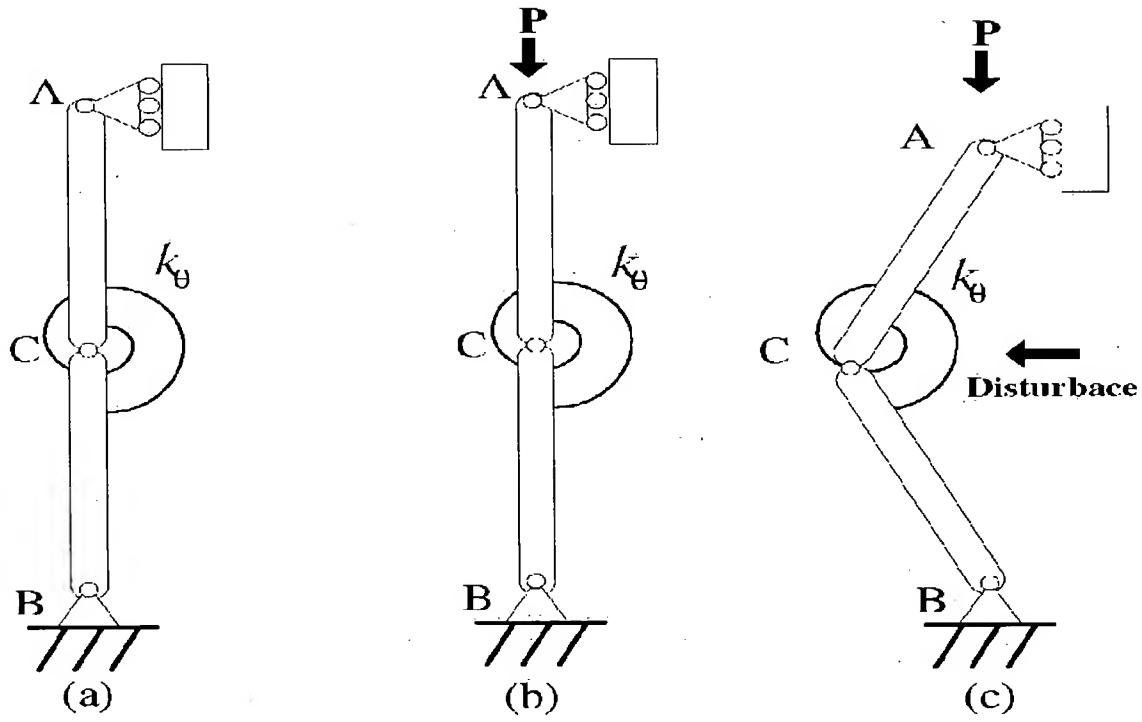
직물을 근사한 변형 단위 양단에 압축력이 인가될 경우, 수축되지 않고 즉시 휨 변형이 발생하는 즉좌굴 모델을 사용하여, 압축력에 의한 상기 변형 단위의 변형 형태를 추정하는 단계;

상기 변형 단위의 상기 추정된 변형 형태로부터 상기 변형 단위에 축적된 휨 변형 에너지를 구하는 단계; 및

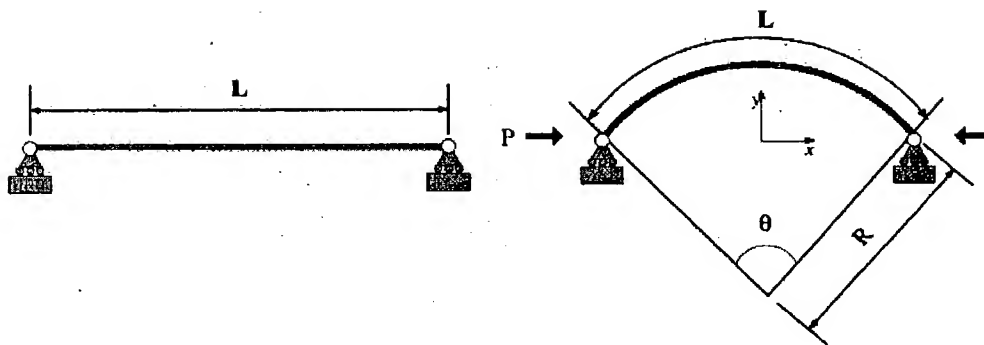
상기 휨 변형 에너지를 이용하여 직물의 휨 변형을 시뮬레이션 하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

## 【도면】

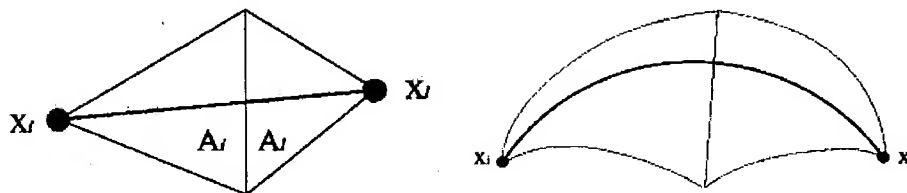
【도 1】



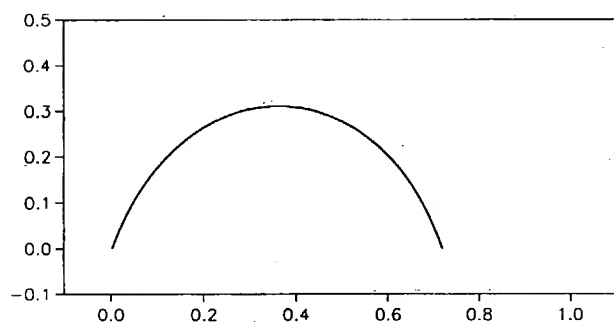
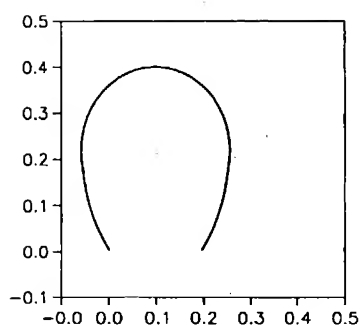
【도 2】



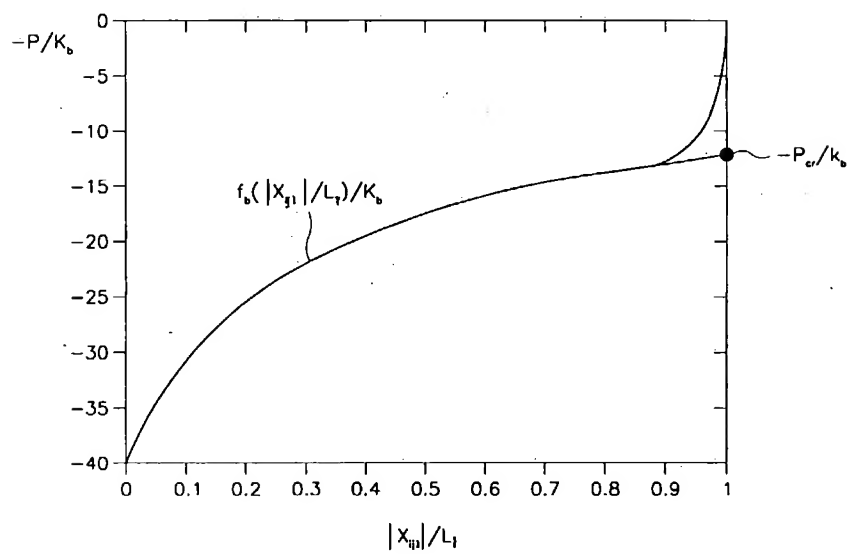
【도 3】



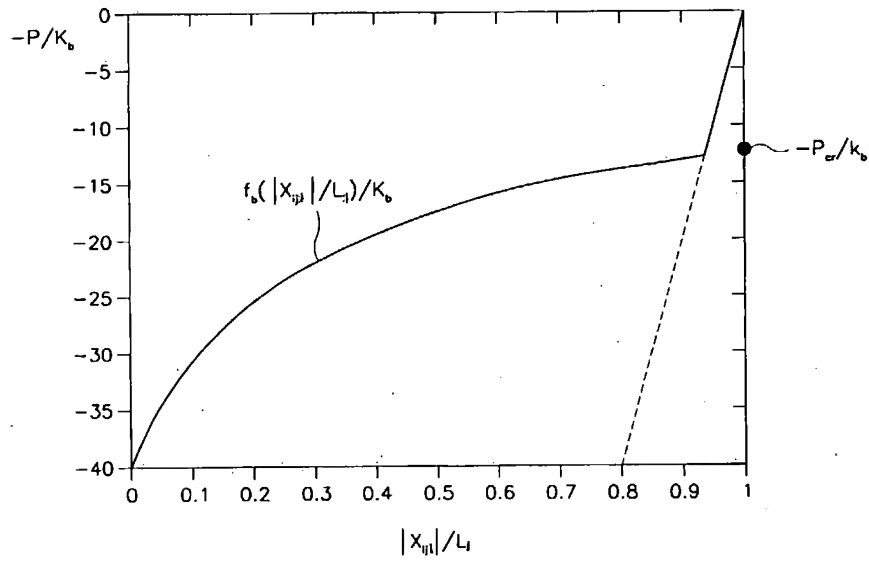
【도 4】

(a)  $P/k_b = 23.50$ (b)  $P/k_b = 35.25$ 

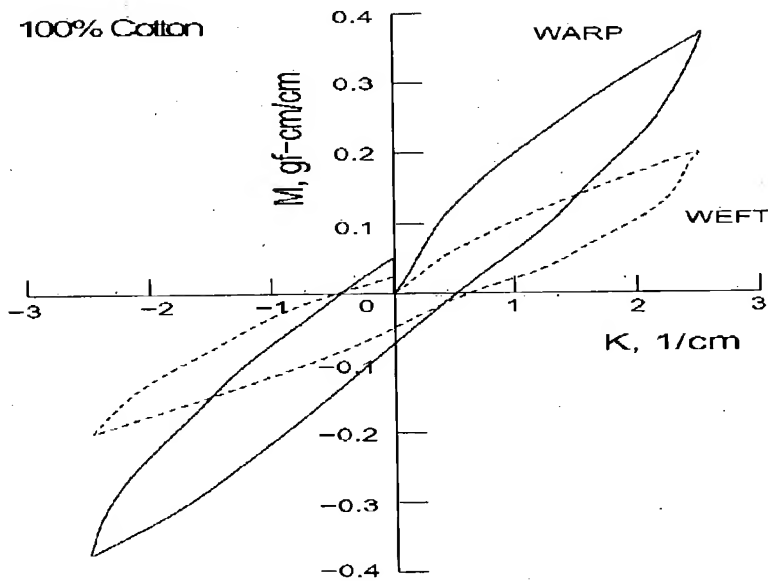
【도 5】



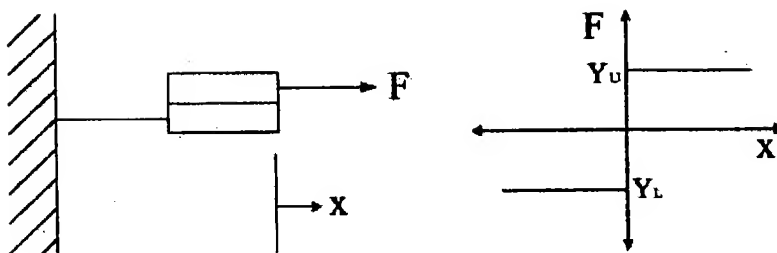
【도 6】



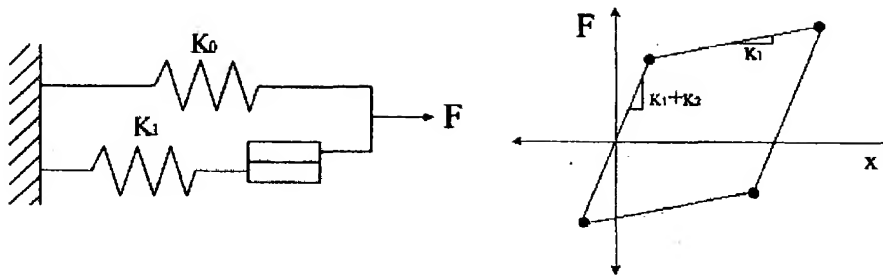
【도 7】



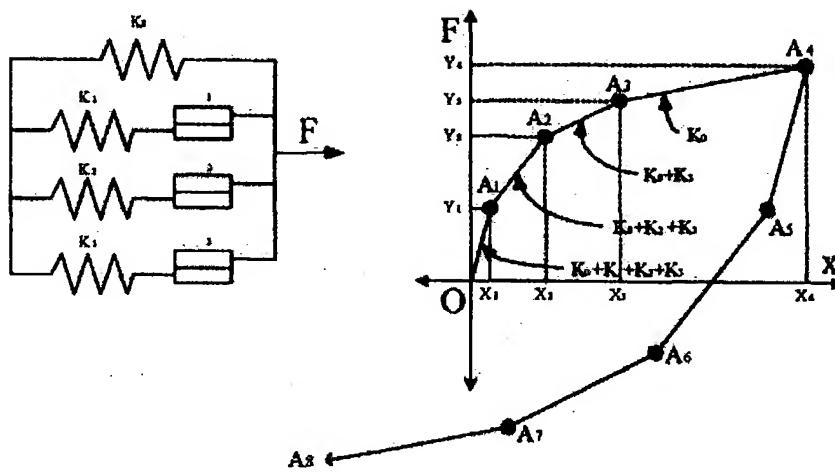
【도 8】



【도 9】



【도 10】



【도 11】

